

論文 部分係数を用いた塩害環境下にある RC 建造物の耐久信頼性設計法に関する基礎的研究

松崎 裕*1・秋山 充良*2・鈴木 基行*3

要旨: 本研究は、コンクリート建造物の塩害に対する耐久性照査を信頼性理論に基づく限界状態設計法の枠組みの中で実現することを目的とした基礎的研究である。海洋からの塩分の飛来から鋼材腐食の発生、さらには、その後の腐食ひび割れの発生までの予測に伴う種々の不確定性を考慮して設計耐用期間内の腐食ひび割れ発生確率を信頼性理論に基づき算定した。その上で、その腐食ひび割れ発生確率を目標値へと漸近させることのできる部分係数と設計規準式を提案した。提案した部分係数と設計規準式を用いることで、設計者は確率計算を行うことなく、意図した耐久信頼性を有するコンクリート建造物を設計できることを示した。

キーワード: 塩害, RC 建造物, 腐食ひび割れ, 耐久信頼性設計, ハザード曲線, フラジリティ曲線

1. はじめに

著者らは、飛来塩分量の評価から鋼材位置における塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生の限界塩化物イオン濃度を超過するか否かを判定するまでの一連のプロセスに介在するバラツキを陽に取り込むことで、設計耐用期間内における鋼材腐食の発生確率の評価手法を提案した¹⁾。また、鋼材腐食が発生しても、鉄筋コンクリート(RC)建造物の構造性能は急激に低下しないことから、耐久設計の合理化を図るため、ある程度の鋼材腐食を許容した耐久設計に関する検討を行い、腐食ひび割れ発生点へと耐久設計上の限界状態を移行することで有意に必要なかぶりを低減できることを示した²⁾。

参考文献 2)に示した手法を用いれば、塩害環境やコンクリートの品質に関わらず、設計耐用期間内の腐食ひび割れの発生確率を目標値に漸近させるための必要なかぶりを決めることができる。しかし、その過程では、設計者が実際に確率計算を行う必要があり、信頼性解析に馴染みがない技術者には煩雑なものである。そこで、部分係数を用いた設計法を提案する。予め目標とする腐食ひび割れ発生確率を確保可能な部分係数を算定しておくことで、確率的な計算を行うことなく、所要の耐久信頼性を確保可能な RC 建造物の必要なかぶりを決定できる。

2. 腐食ひび割れ発生点を限界状態とした RC 建造物の耐久信頼性評価法

2.1 概説

飛来塩分量の評価から腐食ひび割れ発生の評価までに至る種々の不確定性を考慮して、設計耐用期間内における RC 建造物の腐食ひび割れ発生確率を算定するフロ

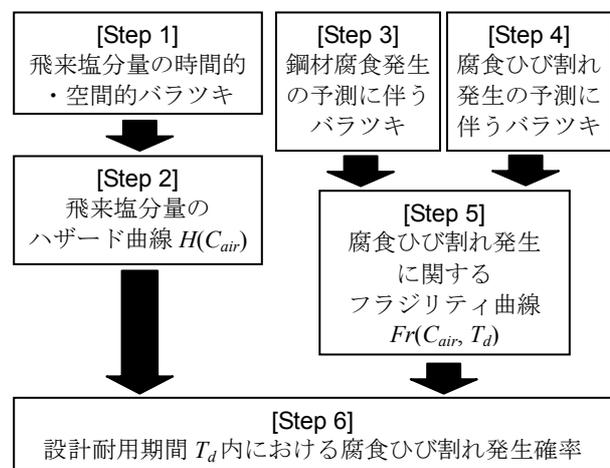


図-1 腐食ひび割れ発生確率の算定フロー

ーの概略を図-1 に示す。この中で、塩害環境の厳しさを飛来塩分量 C_{air} を指標として確率論的ハザード曲線 $H(C_{air})$ として評価する部分(図中, step 1 と step 2), および任意の飛来塩分量に対して塩化物イオンの浸透予測を行い、鋼材位置における塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生の限界塩化物イオン濃度を超過するか否かを判定する部分(図中, step 3)は、参考文献 1)で検討済みである。設計耐用期間内の鋼材腐食量が腐食ひび割れ発生の限界腐食減量を超過するか否かを判定する部分(図中, step 4)は、基本的には参考文献 2)に基づくが、後述するように、鋼材腐食速度の評価法を一部見直している。この step 3 と step 4 より、任意の飛来塩分量が与えられた場合に、設計耐用期間 T_d 内における条件付の腐食ひび割れ発生確率がフラジリティ曲線 $Fr(C_{air}, T_d)$ として算定される(図中, step 5)。最後に、確率論的ハザード曲線とフラ

*1 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻助教 修(工) (正会員)

*2 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻准教授 博(工) (正会員)

*3 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

ジリティ曲線を用いることで、設計耐用期間 T_d 内における腐食ひび割れ発生確率(損傷確率) pf を次式により算定できる(図中、step 6)。

$$pf = \int_0^{\infty} \left(-\frac{dH}{dC_{air}} \right) Fr(C_{air}, T_d) dC_{air} \quad (1)$$

以下では、図-1の step 3 と step 4 で用いる解析モデルと入力パラメータの統計量、および限界状態式について詳細を述べる。

2.2 解析モデルと限界状態式

(1) 鋼材腐食発生の判定方法

鋼材腐食発生の判定を行うためには、供用開始後 t 年での鋼材位置における塩化物イオン濃度 C を評価し、それが鋼材腐食発生の限界塩化物イオン濃度 C_{lim} を超過するか否かを判定する必要がある。このうち、供用開始後 t 年での鋼材位置における塩化物イオン濃度 C は、参考文献1)と同様に、Fickの拡散方程式に基づいて評価する。

$$C(c, C_0, D_c, t) = U_s \cdot C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot c}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right\} \quad (2)$$

ここに、 U_s は Fick の拡散方程式に基づいて塩化物イオン濃度を算定する際のバラツキを考慮する係数¹⁾、 C_0 は表面塩化物イオン濃度、 c はかぶり、 D_c は見かけの拡散係数であり、 $\operatorname{erf}(\cdot)$ は誤差関数である。

式(2)の表面塩化物イオン濃度 C_0 は、参考文献3)に基づき、飛来塩分量 C_{air} の関数として以下のように与える。

$$C_0 = U_c \cdot 0.988 C_{air}^{0.379} \quad (3)$$

ここに、 U_c は飛来塩分量 C_{air} から表面塩化物イオン濃度 C_0 を推定する際のバラツキを考慮する係数である。

また、かぶりの評価に際しては、施工誤差を考慮するものとし、見かけの拡散係数については、水セメント比 W/C から推定する際のバラツキを考慮する。これらの設定方法については、基本的に参考文献1)と同様である。

以上で算定された鋼材位置における塩化物イオン濃度 C が鋼材腐食発生の限界塩化物イオン濃度 C_T を超過した場合に、鋼材腐食が発生すると判定される。従って、 C_T と C の差で評価される式(4)の限界状態式 g_1 が負となった場合に、鋼材腐食が発生すると判定する。

$$g_1 = C_T - C(c, C_0, D_c, t) \quad (4)$$

なお、 U_s 、 U_c 、 C_T の各統計量については後述する。

(2) 腐食ひび割れ発生の判定方法

腐食ひび割れの発生を判定する際は、鋼材の腐食速度に基づいて腐食量の累積値を評価し、それと腐食ひび割れ発生の限界腐食減量を比較する。

このうち、鋼材の腐食速度について、著者らは参考文献2)において、鋼材位置における塩化物イオン濃度の時間変化に基づいて鋼材腐食速度を算定し、その時間積分

値として腐食量を得る手法を採用した。この手法では、塩化物イオン濃度の時間的な増加とともに鋼材の腐食速度が増加することとなる。しかしながら、塩化物イオンは鋼材表面の不動態皮膜の破壊に関与するだけであり、不動態皮膜の破壊後は、塩化物イオン濃度と鋼材腐食速度には明確な相関関係は認められない⁴⁾。

そこで、本研究では、実構造物の鋼材腐食減量の測定から鋼材の腐食速度を算定している中川らの研究⁴⁾を参考にして、腐食ひび割れ発生前の鋼材の腐食速度を評価する。このとき、鋼材の腐食速度を V とすると、設計耐用期間 T_d 経過時点における単位腐食量 Q は次式によって算定される。

$$Q(V, T_{co}, T_d) = V(T_d - T_{co}) \quad (5)$$

ここに、 T_{co} は、式(4)の限界状態式 $g_1 = 0$ を満足するように決定される鋼材腐食発生までの時間である。

なお、中川らの研究のように、実構造物の調査に基づく測定値を用いた場合、構造物周辺の環境の違いが含まれた統計量となるため、その変動係数は大きいものとならざるを得ない。鋼材の腐食速度に影響する、鋼材周辺の含水量や酸素量、さらには温度の影響を反映した腐食速度の算定法が確立されれば、中川らの研究に基づいた場合よりも腐食速度の設定に伴うバラツキが低減でき、腐食ひび割れ発生確率が小さくなると期待される。これらは、今後の課題としたい。

一方、腐食ひび割れ発生の限界腐食減量については、Qi・関⁵⁾の腐食ひび割れ幅-腐食量の算定式を用いて評価する。なお、本研究では、腐食ひび割れ発生点の定義を腐食ひび割れ幅が 0.1mm に達した時点とする。これは、腐食ひび割れ幅 0.1mm を境に鋼材の質量減少率が急増するものが多く^{6,7)}、実験上のひび割れ発生点として用いられること、また、透水性や物質透過性についても急変すると報告^{8,9)}されているからである。

$$Q_{cr}(c) = U_q \frac{\rho_s}{\pi(\gamma-1)} \left(\alpha_0 \beta_0 \frac{0.22 \left\{ (2c+d)^2 + d^2 \right\}}{E_c(c+d)} f'_c{}^{2/3} + \alpha_1 \beta_1 \frac{c+d}{5c+3d} w_c \right) \quad (6)$$

ここに、 Q_{cr} は腐食ひび割れ発生の限界腐食減量、 U_q は腐食ひび割れ幅から腐食量を推定する際におけるバラツキを考慮する係数、 ρ_s は鉄筋の密度、 γ は腐食生成物の体積膨張率で 3.0 とし、 c はかぶり、 d は鉄筋径、 E_c はコンクリートの弾性係数、 f'_c はコンクリート圧縮強度、 w_c は腐食ひび割れ幅(0.1mm)、 α_0 、 β_0 、 α_1 、 β_1 は補正係数⁵⁾である。

なお、コンクリート圧縮強度 f'_c は、コンクリートの水セメント比 W/C との関係式¹⁰⁾を利用して与えることとし、コンクリートの弾性係数については、コンクリート圧縮強度から道路橋示方書¹¹⁾に基づいて定める。

$$f'_c = -20.5 + 21.0/(W/C) \quad (7)$$

表-1 考慮する不確定要因の一覧

不確定要因	確率分布	平均値	変動係数 または 標準偏差
表面塩化物イオン濃度のバラツキを考慮する係数 U_c ³⁾	対数正規	1.43	1.08
拡散方程式の算定値のバラツキを考慮する係数 U_s ¹⁾	対数正規	1.24	0.906
見かけの拡散係数のバラツキを考慮する係数 U_d ¹²⁾	対数正規	1.89	1.84
鋼材腐食発生の限界塩化物イオン濃度 ¹⁾	正規分布	2.03kg/m ³	0.375
かぶりの施工誤差 ¹⁾	正規分布	8.5mm	16.6mm ^{*1)}
腐食ひび割れ発生前の鋼材腐食速度 ⁴⁾	対数正規	6.10 mg/cm ² /年	0.580
腐食ひび割れ発生の限界腐食減量のバラツキを考慮する係数 U_q ²⁾	対数正規	3.86	0.352

*1) かぶりの施工誤差のみ、標準偏差を示しており、かぶりの大きさに関わらず、表中の値を一律に適用する。

以上で得られた設計耐用期間 T_d 経過時点における腐食量 Q と、腐食ひび割れ発生の限界腐食減量 Q_{cr} とを比較する式(8)の限界状態式 g_2 が負となった場合に、腐食ひび割れが発生すると判定する。

$$g_2 = Q_{cr} - Q(V, T_{co}, T_d) \quad (8)$$

2.3 耐久信頼性評価に用いるパラメータの統計量

(1) 鋼材腐食発生の判定に係るパラメータ

鋼材腐食発生の判定に係るパラメータは、基本的に参考文献1)と同様に設定する。ただし、見かけの拡散係数の(実験値)/(解析値)については、前田ら¹²⁾の報告に基づいて統計量の見直しを行い、平均値 1.89、変動係数 1.84 の対数正規分布に従うとしている。

(2) 腐食ひび割れ発生の判定に係るパラメータ

腐食ひび割れ発生の判定に係るパラメータのうち、鋼材腐食速度は中川ら⁴⁾の調査結果に基づいて定める。なお、中川らは、鋼材腐食速度を鋼材の断面減少率で評価しているため、単位腐食量に基づく鋼材腐食速度に変換した。ここで、中川らの調査対象の実橋では、健全時の鉄筋径に若干相違があるものの、直径 15mm 程度の鉄筋を使用した橋梁が多かったことから、全ての場合で直径 15mm の鉄筋が使用されていると仮定し、断面減少率を単位腐食量へ変換した。その結果、腐食速度の平均値は 6.10mg/cm²/年となり、腐食速度の変動係数は 0.580 であった。なお、この鋼材腐食速度の統計量は、松島ら¹³⁾が報告しているものと同程度である。

また、腐食ひび割れ発生の限界腐食減量のバラツキを

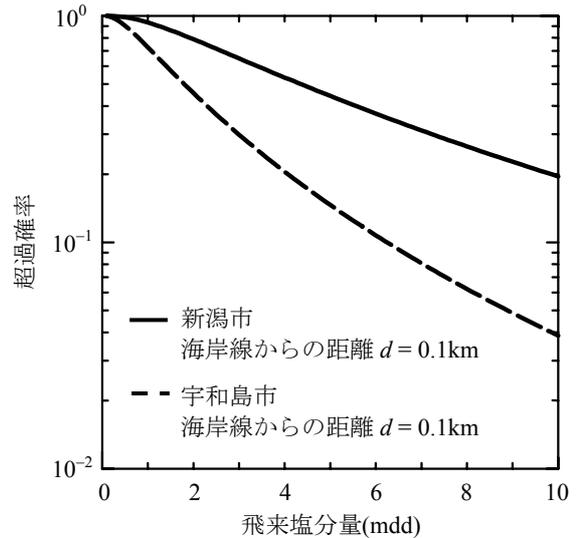


図-2 塩害環境ハザード曲線

考慮する係数 U_q については、参考文献 2)で示した乾湿繰返実験による実験値と Q_i 関の算定式(式(6))による計算値の比として得られる統計量を用いた。

(3) 考慮する不確定要因の一覧

鋼材腐食発生から腐食ひび割れ発生の評価までに係る不確定要因の一覧を表-1にまとめて示す。

2.4 腐食ひび割れ発生点を限界状態とした RC 構造物の耐久信頼性評価

(1) 解析条件

耐久信頼性評価の条件としては、設計耐用期間 T_d を 50 年、軸方向鉄筋 D32 の使用を前提とし、RC 構造物の建設地点としては、塩害環境の相違を考慮するために新潟市と宇和島市のそれぞれの海岸線からの距離 0.1km の地点を想定する。その上で、水セメント比を $W/C = 45, 60\%$ 、かぶりを $c = 100, 200\text{mm}$ と変化させた場合の構造物の耐久信頼性を評価する。

なお、構造物の耐久信頼性は、式(1)で算定される腐食ひび割れ発生確率 pf を以下の関係式に基づいて信頼性指標 β へと変換したものをを用いて評価する。

$$\beta = -\Phi^{-1}(pf) \quad (9)$$

ここに、 $\Phi(\cdot)$ は標準正規分布の累積分布関数である。

(2) 塩害環境ハザード曲線

参考文献1)の手法に基づいて算定された解析対象地点の塩害環境ハザード曲線を図-2に示す。

(3) フラジリティ曲線

フラジリティ曲線の算定結果を図-3に示す。図から明らかなように、水セメント比が小さく、また、かぶりが大きいくほど、鋼材位置への塩化物イオンの浸透が抑えられることから、条件付の腐食ひび割れ発生確率(損傷確率)が小さくなることが確認される。

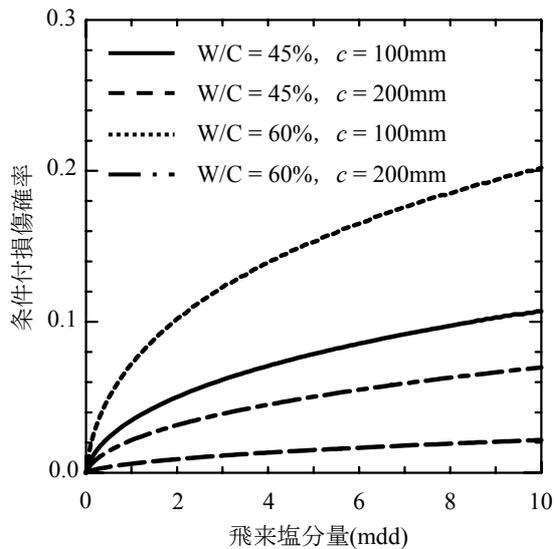


図-3 フラジリティ曲線

表-2 耐久信頼性評価結果

解析条件	信頼性指標 β	
	新潟市 $d = 0.1\text{km}$	宇和島市 $d = 0.1\text{km}$
W/C = 45%, $c = 100\text{mm}$	1.45	1.62
W/C = 45%, $c = 200\text{mm}$	2.19	2.34
W/C = 60%, $c = 100\text{mm}$	1.07	1.26
W/C = 60%, $c = 200\text{mm}$	1.67	1.83

(4) 信頼性指標

図-2 に示した塩害環境ハザード曲線と図-3 に示したフラジリティ曲線を用いて、式(1)および式(9)によって当該地点に位置する RC 構造物の腐食ひび割れ発生の可能性を信頼性指標として求めた。結果を表-2 に示す。

同一のかぶりでも水セメント比や RC 構造物の位置する塩害環境により RC 構造物の信頼性指標 β は異なっており、所要の耐久信頼性を確保する上で、全国一律な最小かぶりを設定することはできないことを示している。次章では、所要の耐久信頼性を RC 構造物に付与するための耐久信頼性設計法を構築する。

3. 腐食ひび割れ発生点を限界状態とした RC 構造物の耐久信頼性設計法

3.1 概説

本章では、腐食ひび割れ発生点を限界状態として、塩害環境やコンクリートの品質の相違に関わらず、所要の耐久信頼性を確保可能な耐久信頼性設計法を構築する。その際、設計者に確率的な計算を求めない部分係数による設計法を採用する。

3.2 部分係数と設計規準式

設計耐用期間 T_d 内の腐食ひび割れの発生を許容しないことから、部分係数 γ_1 と γ_2 を用いた腐食ひび割れ発生

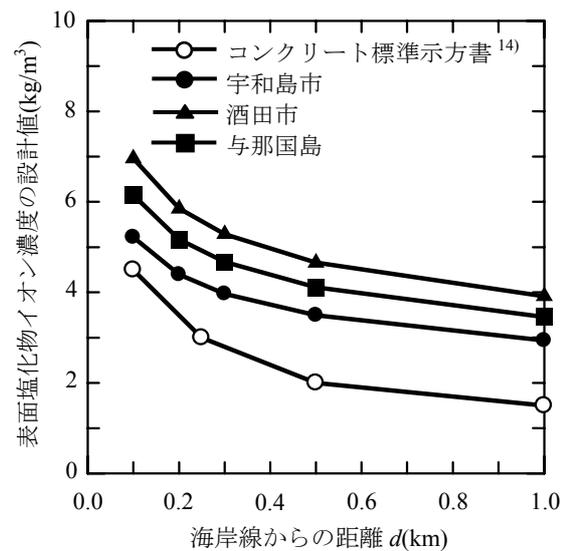


図-4 表面塩化物イオン濃度の設計値

時間の設計値 $T_{crack,d}$ が T_d 以上であることを確認する設計規準式(式(10))を提案する。

$$\frac{T_d}{T_{crack,d}} \leq 1 \quad (10)$$

$$T_{crack,d} = \frac{T_1}{\gamma_1} + \frac{T_2}{\gamma_2} \quad (11)$$

ここに、 T_1 、 T_2 は、それぞれ次の関係式を満足するように定める鋼材腐食発生までの時間、および鋼材腐食発生から腐食ひび割れ発生までの時間である。また、部分係数 γ_1 は T_1 の評価に介在する不確定性に対応するための部分係数、部分係数 γ_2 は T_2 の評価に介在する不確定性に対応するための部分係数である。

$$C_{0,d} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot c_d}{2\sqrt{D_{c,d} T_1}} \right) \right\} = C_{lim,d} \quad (12)$$

$$T_2 = \frac{Q_{cr,d}}{V_d} \quad (13)$$

ここに、 $C_{0,d}$ は後述する表面塩化物イオン濃度の設計値、 c_d は設計かぶり、 $D_{c,d}$ は見かけの拡散係数の設計値であり、参考文献1)と同様に、前田ら¹²⁾の算定式に基づく D_c として与える。 $C_{lim,d}$ は鋼材腐食発生の限界塩化物イオン濃度の設計値で 2.03kg/m^3 とし、 $Q_{cr,d}$ は式(6)において U_q にその中央値を与えて算定される腐食ひび割れ発生の限界腐食減量の設計値、 V_d は鋼材腐食速度の設計値であり、表-1に基づいて中央値として与える。

3.3 表面塩化物イオン濃度の設計値

表面塩化物イオン濃度の設計値 $C_{0,d}$ は、地域の塩害環境や海岸線からの距離の相違に関わらず、同程度の耐久信頼性を確保できるように、参考文献1)で提示した $C_{0,d}$ の算定式を式(14)のように見直した。この見直しは、参考文献1)では、鋼材位置における塩化物イオン濃度とそ

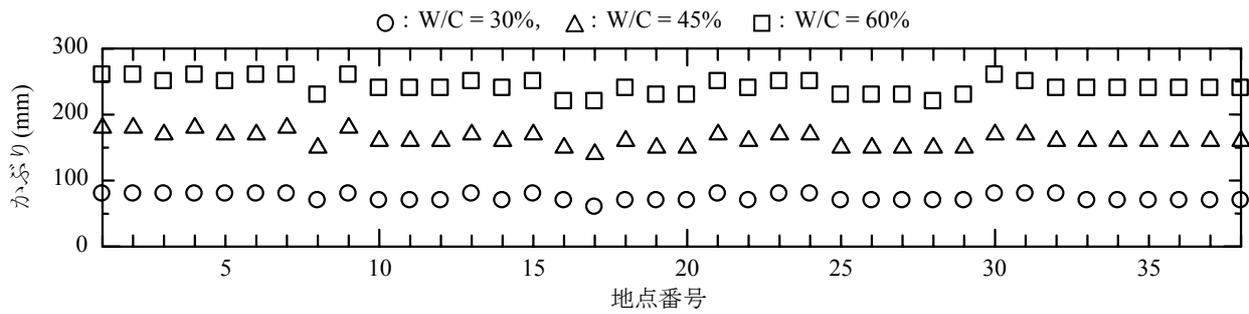


図-5 提案した設計規準式と部分係数によって設計された RC 構造物のかぶり

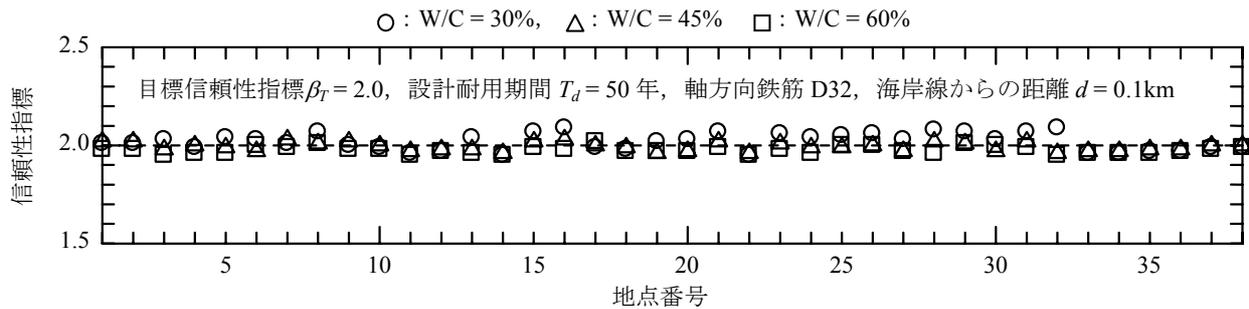


図-6 提案した設計規準式と部分係数によって設計された RC 構造物の信頼性指標

表-3 目標信頼性指標に対応した部分係数

目標信頼性指標 β_T	γ_1	γ_2
1.5	1.0	1.0
2.0	4.0	1.0

の限界値を比較していた設計規準式を式(10)のように時間軸で照査する形式の設計規準式へと変更したことなどに依るものである。

$$C_{0,d} = 4.2r^{0.25}u^{0.1}d^{-0.25} \quad (14)$$

ここに、 r は海風比率、 u は平均風速、 d は海岸線からの距離である。

表面塩化物イオン濃度の設計値 $C_{0,d}$ を幾つかの地点で算定したものを図-4に示す。同一の海岸線からの距離であっても、地域によって $C_{0,d}$ の値が変化しており、塩害環境の相違が反映されていることが確認される。なお、現行のコンクリート標準示方書¹⁴⁾における設計値は、地域の違いを考慮できないものだが、その距離減衰性状は、提案した式(14)とほぼ同程度になっている。

3.4 部分係数の算定手順

式(10)の設計規準式では、2つの部分係数 γ_1 と γ_2 を用いたが、実際には、どちらかの部分係数を固定し、もう一方の部分係数を小さくすることのみで所要の耐久信頼性を確保可能である。そこで、 $T_1 > T_2$ の関係があることから、 $\gamma_2 = 1.0$ とし、 γ_1 を目標とする耐久信頼性に応じて変化させることにした。将来的に、鋼材腐食発生までの評価に係るパラメータの統計量の改善や精度の良い解析モデルが使用された場合には γ_1 を修正し、同様に、そ

れ以降で腐食ひび割れ発生までの評価に係るものが見直された場合には γ_2 を修正することにした。

以上のことを踏まえた上で、部分係数 γ_1 は次の手順により決定する。なお、部分係数を算定する際に想定する構造物の建設地点としては、参考文献1)と同じ全国38地点(北海道～沖縄県)とする。

- 1) 目標信頼性指標 β_T を設定する。
- 2) 部分係数 γ_1 の値を仮定する。
- 3) 全国38地点に対して、式(10)を満足する設計かぶりを算定し、その設計かぶりを有するRC構造物の腐食ひび割れ発生確率を2章に示した手法で算定する。
- 4) 全国38地点で算定された腐食ひび割れ発生確率 pf_i ($i=1,2,\dots,38$)について、式(9)により信頼性指標 β_i に変換する。
- 5) 以下の目的関数 w を最小にする部分係数 γ_1 の値を探索できるまで、2)～4)を繰り返す。

$$w = \sum_{i=1}^{38} (\beta_i - \beta_T)^2 \quad (15)$$

3.5 目標耐久性レベル

目標耐久性レベルに相当する目標信頼性指標 β_T は、本研究では $\beta_T = 1.5, 2.0$ とした。これは、参考文献1)で検討したように、現行のコンクリート標準示方書に準拠して耐久設計を行った場合、鋼材腐食発生確率に対応する信頼性指標が概ね1.5～2.0程度の範囲にあったことを踏まえて設定したものである。

3.6 部分係数の試算

目標信頼性指標毎に部分係数を試算した結果を表-3

に示す。また、試算された部分係数を用いて式(10)の設計規準式により決定された RC 構造物のかぶりを図-5に示し、各 RC 構造物の腐食ひび割れ発生確率を求め、それらを信頼性指標に変換した結果を図-6に示す。図-5および図-6は、 $\beta_r=2.0$ のときの結果である。

提案した部分係数による設計法を用いることで、コンクリートの品質や塩害環境の相違に応じて図-5のように適切なかぶりの大きさが決定され、図-6に示したように、概ね目標とする β_r を確保できる。

4. まとめ

本研究は、構造設計の分野で用いられてきた信頼性設計の考えを耐久設計へ適用することを試みた基礎的研究である。本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 海洋からの塩分の飛来から腐食ひび割れ発生の判定までの一連のプロセスに介入する種々のパラツキを陽に考慮した上で、腐食ひび割れ発生確率を定量化した。
- 2) 腐食ひび割れ発生確率を目標値へと漸近させることのできる耐久信頼性設計法を構築した。提案した部分係数と設計規準式を用いることにより、設計者は確率計算を行うことなく、コンクリートの品質や塩害環境によらず所要の耐久信頼性を概ね確保したコンクリート構造物を設計できる。

参考文献

- 1) 秋山充良, 伊東佑香, 鈴木基行: 塩害環境下における鉄筋コンクリート構造物の耐久信頼性設計に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.2, pp.385-401, 2006.7
- 2) 佐藤広和, 李月鳳, 秋山充良, 鈴木基行: 腐食ひび割れ発生点を限界状態とした RC 構造物の耐久信頼性設計に関する基礎的研究, コンクリート工学年次

論文集, Vol.29, No.1, 2007.7

- 3) 建設省土木研究所: 土木研究所資料 飛来塩分量全国調査(III)-調査結果およびデータ集-, 土木研究所資料, 第 2687 号, 1988.
- 4) 中川貴之, 瀬下雄一, 鬼束俊一, 堤知明: 海洋環境下における RC 構造物の鉄筋腐食速度の評価, コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム, pp.325-330, 2004.10
- 5) QI Lukuan, 関博: 鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.161-171, 2001.2
- 6) 榎田佳寛, 花榮浩, 松林裕二, 原謙治, 安田正雪: 塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する実験, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 435 号, pp.19-27, 1992.5
- 7) 松林裕二, 榎田佳寛, 笹渕優樹: 塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する屋外暴露実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 536 号, pp.9-15, 2000.10
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書 [維持管理編], 2001.
- 9) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編, 2002.
- 10) 三浦尚: 土木系 大学講義シリーズ 8 土木材料学 (改訂版), コロナ社, 1986.
- 11) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, 2002.
- 12) 前田聡, 武若耕司, 山口明伸: 塩害データベースを用いたコンクリート中への塩化物イオン拡散の定量評価, 土木学会論文集, No.760/V-63, pp.109-120, 2004.5
- 13) 松島学, 中川貴之, 堤知明: 塩害を受けた既設構造物の劣化予測に関する研究, 土木学会論文集, No.679/VI-51, pp.93-100, 2001.6
- 14) 土木学会: コンクリート標準示方書 [施工編], 2002.